УДК 631.362.001.573

Ю.И.ЕРМОЛЬЕВ, А.И.МАРТЫНЕНКО, А.В.БУТОВЧЕНКО

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СЕПАРАЦИИ ЗЕРНА В ВОЗДУШНО-РЕШЁТНОЙ ЗЕРНООЧИСТИТЕЛЬНОЙ МАШИНЕ

Построена адекватная математическая модель процесса функционирования воздушно-решётной зерноочистительной машины с многоярусными решётными модулями.

Ключевые слова: *воздушно-решётная зерноочистительная машина, процесс сепарации, математическая модель.*

Введение. Тенденция минимизации затрат на семенную очистку зерна и снижение при этом количества транспортных операций определила необходимость создания воздушно-решётных зерноочистительных машин с решётными модулями, обеспечивающими сепарацию зерна на двух последовательных модулях. Такая структура воздушно-решётных машин требует развития методологии моделирования процессов сепарации зерна в этих машинах для возможной реализации их структурно-параметрического синтеза.

Теоретическое обоснование. Математическую модель процесса сепарации зернового материала (ЗМ) воздушно-решетной зерноочистительной машины типа МВУ-1500 (ВРМ) (рис.1, 2) как замкнутой квазистатичной системы с заданной $\kappa_{\delta M}$-й функциональной схемой, в общем виде можно записать:

$$\mathrm{E}_{\phi} = \left\{ F_{BPM}, A_{BPM}, G_{\delta}\left[k_{\delta M}(x), T_{\delta M}(x) \right] \right\} \to \max \quad \text{(функция цели);} \qquad (1)$$

$$\vec{A}_M \quad \vec{A}_M, \quad \vec{F} \quad \vec{F}, \quad x \quad G_M(x,u); \qquad (2)$$

$$в_j \quad в_j, \quad \delta_з \quad [\delta_з]. \qquad (3)$$

Здесь $\vec{F} = \vec{F}_{BPM}$ - вектор входных воздействий на принятую в ВРМ систему операций (см. рис.1, 2), где Q - подача ЗМ в ВРМ; a_j, W - содержание в исходном ЗМ j-х компонентов, их влажность; $M(b_j)$ - математические ожидания размеров признаков разделения j-х компонентов; $f_Q(B)$ - плотность вероятности распределения подачи Q ЗМ по ширине B рабочих органов зерноочистительных машин; $\vec{A}_i$ - векторы управляющих факторов элементов ВРМ, обеспечивающих ее функционирование ($\vec{A}_{ПС1}$ и $\vec{A}_{ПС2}$ - 1-го и 2-го пневмосепаратора; $\vec{A}_{РМП}$ и $\vec{A}_{РМВ}$ - 1-го и 2-го решетного модуля) (см. рис.1), где $B_П, S_П$ - ширина и глубина пневмосепаратора ВРМ; $V_в$ - рабочая скорость воздушного потока; плотность вероятностей распределения подачи $f_Q(B_п)$ ЗМ и воздушного потока $f_v(B_п)$ по ширине $B_п$ пневмосепаратора; T_I, l_i, B_i, C - тип, длина, ширина i-го решета и количество решет в решетных модулях; b_{0i} - рабочий размер отверстий в i-м решете; α, β, R, n - угол наклона решет, направленность их колебаний, амплитуда и частоты их колебаний; $k_\mu(x)$ - схема расположения решет в решетных модулях;

$K_{\delta\,M}(x)$ - функциональная схема и параметры ВРМ.

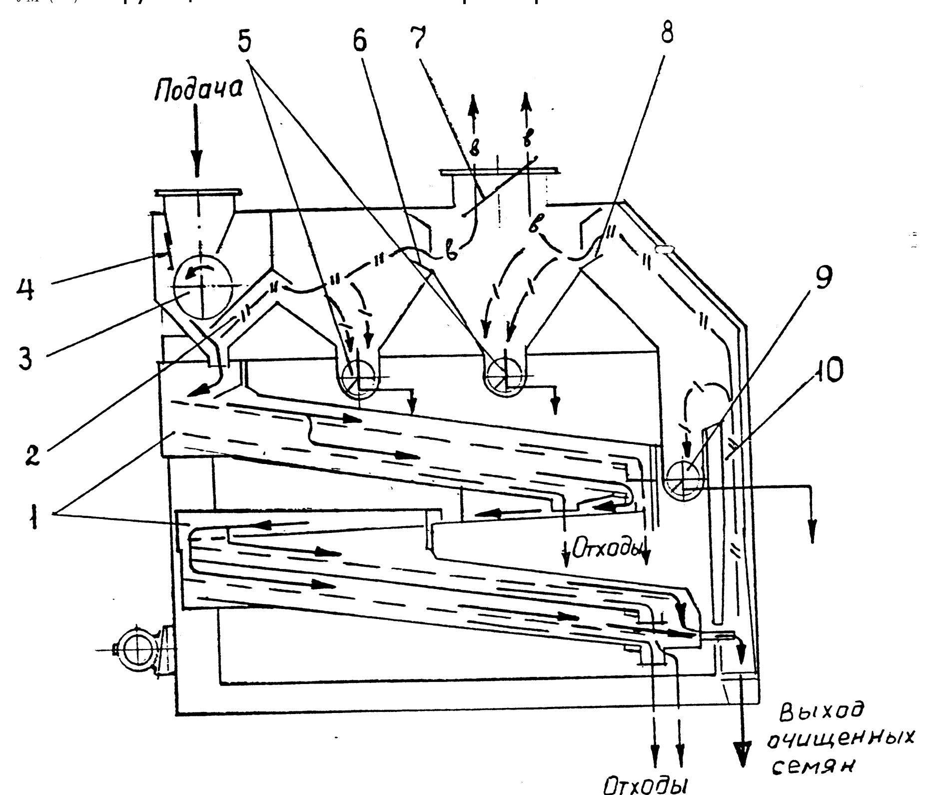


Рис.1. Функциональная схема воздушно-решетной зерноочистительной машины: 1 – решетные станы; 2 – пневмоканал предварительной аспирации; 3 – валик питающий; 4 – шибер; 5 - шнеки отвода легких воздушных примесей; 6 – заслонка тонкой регулировки пневмоканала предварительной аспирации; 7 – заслонка грубой регулировки подачи воздуха; 8 – заслонка тонкой регулировки пневмоканала окончательной аспирации; 9 – шнек вывода тяжелых воздушных примесей (легкое зерно); 10 – пневмоканал окончательной аспирации;
поток обрабатываемой культуры;
воздушный поток с легкими примесями;
примеси, осаждаемые в камере;
воздушный поток с пылью;
отходы решетной очистки

Здесь x - набор технологических операций из $G_{м}(x,u)$ множества, реализуемых в $K_{\delta\,м}$ функциональной схеме ВРМ (см. рис.1); $G_{\delta}K_{\delta\,MM}(x), T_{\delta}(x)$ - математическая модель, определяющая показатели технологического процесса в ВРМ, для принятой $K_{\delta\,M}(x)$ -й ее схемы.

Выходные показатели функционирования ВРМ определяются вектором $\vec{B}_{BPM}$, независимые аргументы которого случайные в вероятностно-статистическом смысле величины (см. рис.2), где $E_{ф}$ - критерий эффективности реализации технологического процесса ВРМ; $\varepsilon_{вj}$ - полнота выделения из ЗМ в очищенную фракцию отделяемых j-х компонентов $в_{jcп}, в_{МП}, в$ - содержание в очищенных семенах j-х компонентов, зерновых и сорных

примесей; δ_C - потери семян на xi операциях; $Q_{OC}, Q_{ПС}, Q_C, Q_{OK}$ - массы выхода очищенных семян, отходов из пневмоканалов и отходов сорных и разных категорий.

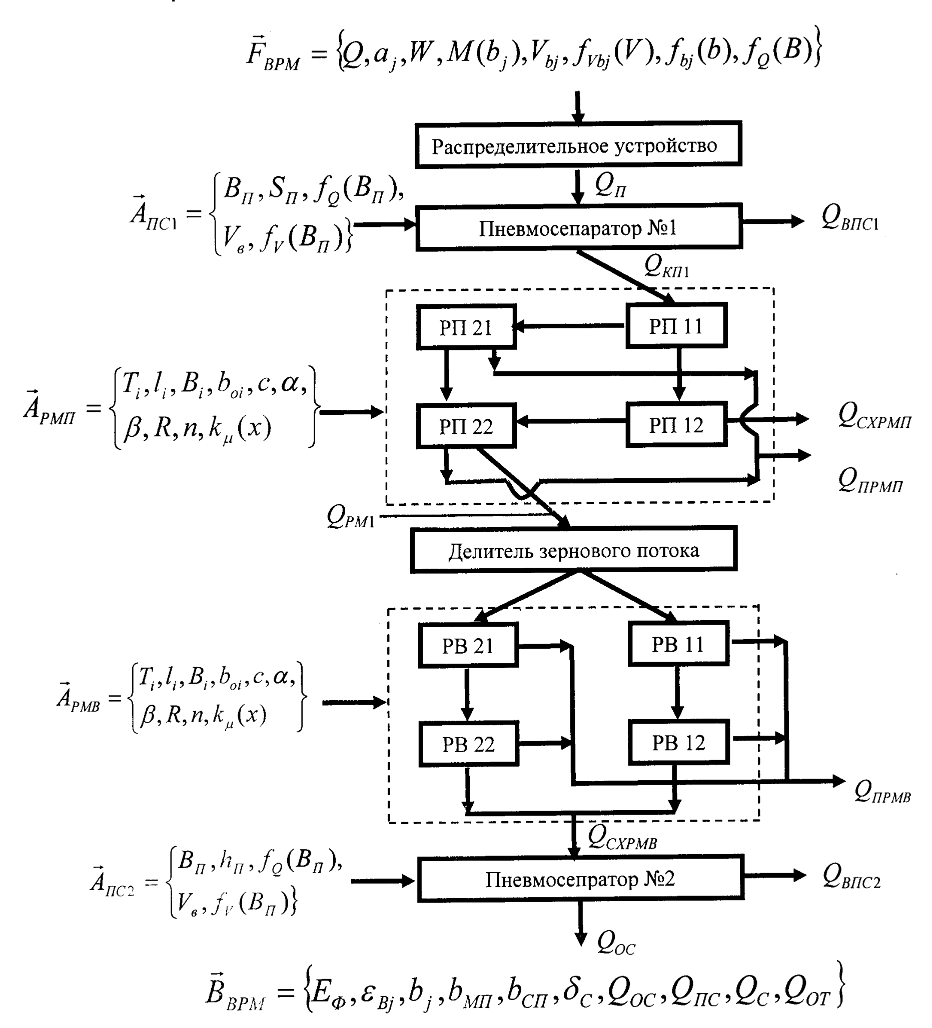


Рис.2. Структурная схема воздушно-решетной зерноочистительной машины

Обоснуем математическую модель $G_\delta \quad K_{\delta M}(X), T_\delta(X)$ ВРМ. В соответствии с функциональной схемой рассматриваемая (см. рис.1, 2) ВРМ содержит два пневмосепаратора (№1 и №2) и два решетных модуля с известными функциональными связями между частными технологическими операциями. Для этих условий полнота выхода ε_{Bj} j-го компонента исходного ЗМ в очищенную в ВРМ фракцию семян:

$$\varepsilon_{Bj} = \overset{5}{\underset{i=1}{}} \varepsilon_{bji}\ , \qquad (4)$$

где ε_{bji} - полнота выхода j-го компонента с i-го (i =1,2,3,4) рабочего органа на $(i+1)$ рабочий орган ВРМ и с 5-го $(i=5)$ рабочего органа в очи-

щенные ВРМ семена ($i=1$ - операция распределения ЗМ семян по ширине пневмосепаратора №1; $i=2$ - операция пневмосепарации в пневмосепараторе №1; $i=3$ - операции в первом решетном модуле; $i=4$ - операции во втором решетном модуле; $i=5$ - операция в пневмосепараторе №2).

Полнота выхода ε_{bOTj} в отходы j-го компонента ЗМ в ВРМ:

$$\varepsilon_{bOTj} = \sum_{M=1}^{2} Q_{bOTji} \; b_{bOTji} / Q \; a_j \,, \tag{5}$$

где Q_{bOTji} - количество j-го компонента ЗМ, выделенного i-м рабочим органом ВРМ в отходы; b_{bOTji} - содержание j-го компонента в отходах i-го рабочего органа ВРМ.

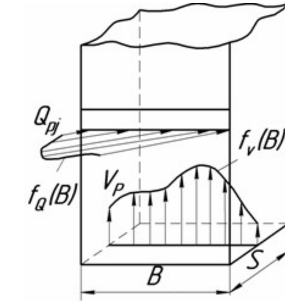


Рис.3. Схема пневмоканала

Для операции распределение ЗМ по ширине пневмосепаратора очевидно, что $\varepsilon_{bj(2)} = 1$. Воздействие этой операции на последующую определится плотностью вероятности $f_Q(B_\Pi)$ распределения подачи Q ЗМ по ширине Вп пневмосепаратора №1.

Рассмотрим процесс пневмосепарации ЗМ в пневмосепараторе №1 (ПС1) шириной B и глубиной S (рис.3) с подачей Q в него гетерогенной сыпучей среды с известной или задаваемой плотностью вероятностей $f_Q(B)$ распределения этой подачи по ширине бокового ввода в ПС1 и плотностью вероятности $f_V(B)$ распределения средних по сечению пневмоканала скоростей воздушного потока.

Для этих условий полнота прохода j-го компонента ЗМ в очищенную на этой частной операции фракцию [1]:

$$\varepsilon_{Cj} = \frac{\sum_{p=1}^{e} Q_P \varepsilon_{Pj}(Q_{Pj} V_P)}{B \; Q K} m_{jB} \; m_{jw}\,, \tag{6}$$

где $K = B/e$; Q_p - количество ЗМ, попадающего на каждый р-й участок (р=1,2,…,е) к-й ширины В рабочего органа:

$$Q_p = \frac{B \; Q_0}{K} \frac{\int_{p-1}^{p} f_Q(B)\,dB}{\int_{p=1}^{e} f_Q(B)\,dB}, \tag{7}$$

а средняя скорость воздушного потока на ρ-м участке:

$$V_p = \frac{B \cdot V}{K} \cdot \frac{\int_{p-1}^{p} f_v(B)dB}{\int_{p=1}^{e} f_v(B)dB}; \tag{8}$$

$\varepsilon_{Pj}(Q_P V_p)$ - полнота выхода в очищенную фракцию после пневмосепаратора №1 j-го компонента ЗМ с p-го участка ширины пневмосепаратора (p=1,2,…, e), определится из известных выражений [1] при $Q=Q_P$ и $V=V_P$.

Содержание сорных $(j=1,2,...,c)$ примесей $b_{СП}$ в очищенных пневмосепаратором №1 семенах, содержащих $j\in 1,2,...,$ компонентов:

$$b_{СП}=\sum_{j=C} a_j\varepsilon_{Cj} / \sum_{j=1}^{b} a_j\varepsilon_{Cj}\ , \qquad (9)$$

полнота выделения пневмосепаратором №1 в отходы сорных (j = 1,2,…,c) примесей:

$$\varepsilon_{bсП}=\sum_{J=C} a_j(1-\varepsilon_{cj})\ /\ \sum_{j=1}^{c} a_j\ , \qquad (10)$$

содержание j– х компонентов в очищенной пневмосепаратором №1 фракции:

$$b_{jП}=a_j\varepsilon_{Cj} / \sum_{j=1}^{b} a_j\varepsilon_{Cj}\ , \qquad (11)$$

Полнота выделения j–го компонента из ЗМ в пневмосепараторе №1

$$\varepsilon_{bjП}=(1-\varepsilon_{Cj})\ , \qquad (12)$$

содержание j–го компонента b_{jO} ЗМ в легких отходах:

$$b_{joП}=a_j(1-\varepsilon_{Cj})/(\sum_{j=1}^{b} a_j(1-\varepsilon_{Cj})\ ),\ ; \qquad (13)$$

масса Q_O выделенных отходов кг/(м·с):

$$Q_{ОП}=\sum_{j=1}^{b} Qa_j(1-\varepsilon_{Cj})\ , \qquad (14)$$

масса очищенных в пневмосепараторе №1 зерна

$$Q_{КП1}=Q-Q_{ОП}\ , \text{ кг/(м·с)}. \qquad (15)$$

Входное воздействие на рассматриваемый решетный модуль №1 (рис.2) выражается вектором $\vec{F}_p$, независимые аргументы которого случайные, в вероятностно-статистическом смысле величины:

$$\vec{F}_p = Q_{рм}, a_{pj}, W, M(b_j), \sigma^2(b_j), f_Q(B_i), f_Q(H), f(l_i)\ . \qquad (16)$$

Активные средства, определяющие эффективность функционирования решетного модуля, определялись вектором $\vec{A}_{рМП}$ (см. рис.2), где $Q_{рм}, a_{pj}, W$ - подача ЗМ $Q_{РМ}=Q_{КП1}$ из выражения (15), содержание в нем j-х компонентов, его влажность W; $M(b_j), \sigma^2(b_j)$ - статистические характеристики размера признака разделения j-го компонента; $f_Q(B_i)$ - плотность вероятности распределения j-го компонента по ширине B_i i-го решета яруса в решетном модуле; $f(l_i)$ - закономерность поступления ЗМ на решета.

Рассмотрим решетные модули в ВРМ (см. рис.2) включающие классический двухъярусный модуль (решета РП11, РП12, РП21, РП22) и два па-

раллельно функционирующих двухрешетных яруса (решета РВ11, РВ12; РВ21, РВ22).

Для классического двухъярусного решетного модуля полнота выхода j-го компонента ЗМ ε_{bjip}, в очищенную фракцию на p-м участке ширины решет в решетном модуле, определится из известного выражения [1]:

$$\varepsilon_{bjip} = \left(1 - \varepsilon_{22jp}\right) \varepsilon_{11jp}\left(1 - \varepsilon_{21jp}\right) + \varepsilon_{12jp}\left(1 - \varepsilon_{11jp}\right) , \qquad (17)$$

где $\varepsilon_{11jp}, \varepsilon_{12jp}, \varepsilon_{21jp}, \varepsilon_{22jp}$ - полнота просевания j-го компонента через p-й участок ширины B_p решет (рис.4) с соответствующим номером решет (см. рис.2).

При известной или задаваемой плотности $f_Q(B)$ (рис.4) распределения вероятности подачи $Q_{КП1}$ ЗМ (поступающего после пневмосепаратора №1 на первый решетный модуль) по ширине B решет в модуле, приняв известную гипотезу [1], аддитивную по всей ширине решетного модуля полнота выхода j-го компонента ЗМ в очищенную фракцию i-го решетного модуля ($i = 1$) можно определить по известным [2] выражениям:

$$\varepsilon_{вji} = \frac{\sum_{p=1}^{e} Q_{pi} a_{ji} \varepsilon_{bjip}\left(Q_{pi}\right)}{Q_i a_{ji} e} , \qquad (18)$$

где Q_{pi} - подача ЗМ на p-й участок ширины i-е решетного модуля ($i = 1$); a_{ji} - содержание j-го компонента в ЗМ, поступающего на i-й решетный модуль; Q_i - суммарная подача ЗМ на i-й (первый) решетный модуль.

Очевидно, что Q_i и a_{ji} соответствуют этим показателям в ворохе, очищенном в пневмосепараторе №1:

$$Q_i = Q_{КП1} = Q_{ОП1} ; \qquad a_{ji} = b_{jП} , \qquad (19)$$

где $Q_{ОП}$ - из выражения (13); $b_{jП}$ - из выражения (11); величину Q_{pi} определяем из выражения, аналогичного (7):

$$Q_{pi} = \frac{B_O Q_i}{K} \frac{\int_{p-1}^{p} f_Q(B)\, dB}{\int_{p=1}^{e} f_Q(B)\, dB} . \qquad (20)$$

Общий выход Q_{b1}, очищенной на первом решетном модуле фракции семян и содержание в ней j-х компонентов b_{bj1}, определяем из выражений:

$$Q_{b1} = \sum_{j=1}^{b} Q_i a_{ji} \varepsilon_{bji} ; \qquad (21)$$

$$b_{bj1} = Q_i a_{ji} \varepsilon_{bji} / Q_{b1} . \qquad (22)$$

Общее выделение примесей $Q_{П1}$ из ЗМ на 1-м решетном модуле и содержание в них j-го компонента $b_{Пj1}$ определяем из выражений:

$$Q_{П1} = \sum_{j=1}^{b} Q_i a_{ji}\left(1-\varepsilon_{bji}\right);\qquad (23)$$

$$b_{Пj1} = Q_i a_{ji}\left(1-\varepsilon_{bji}\right)\Big/Q_{П1}.\qquad (24)$$

Рассмотрим в общем случае второй 2-ярусный решетный модуль (рис.2, рис.5) с неоднородными по длине ($l_{11},\ldots l_{1n}$) и высоте (δ=1,2,…) решетами: 1-й ярус – решета Р11 и Р12, 2-й ярус – Р21 и Р22 (рис.5). В общем виде на два яруса решет поступает q_{1j}, q_{2j} количество j-го компонента ЗМ с их торцев, определяемое плотностью вероятности распределения $f_Q(H)$ случайной величины $Q = Q_{b1}$.

Распределения случайной величины q_δ по ширине B_p сепараторов в ярусах определится плотностью вероятности $f_Q(B)$.

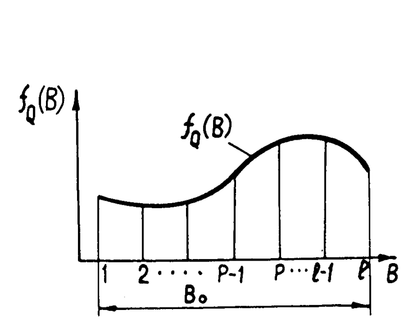


Рис.4. Плотность распределения вероятности $f_Q(B)$ непрерывной случайной величины Q по ширине B_o решетных сепараторов

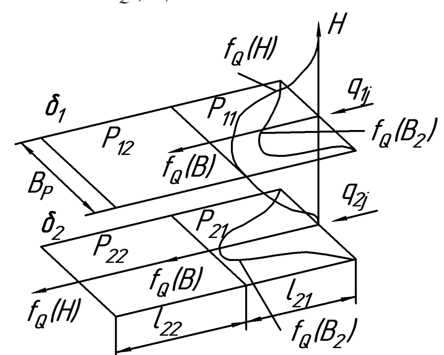


Рис.5. Схема решетного модуля

Приняв известную гипотезу об аддитивности процесса сепарации сыпучего материала на p-х участках решетных ярусов, полноту просеивания j-го компонента ЗМ на δ -м решетном ярусе определяем известным выражением [2].

При известных $f_Q(H)$ и $f_Q(B)$

$$\varepsilon_{\delta j} = \frac{\sum_{p=1}^{e} Q \frac{\int_{r-1}^{r} f_Q(H)dH}{\int_{r=1}^{c} f_Q(H)dH} \cdot \frac{\int_{p-1}^{p} f_Q(B)dB}{\int_{p=1}^{e} f_Q(B)dB}\, a_{j\delta}\, \varepsilon_{\delta jp}(q_{\delta p})}{\sum_{j} q_\delta a_j},\qquad (25)$$

где $\varepsilon_{\delta jp} = \varepsilon_{\delta 1j} + (1-\varepsilon_{\delta 1j})\varepsilon_{\delta 2j}$; r - количество участков по высоте H плотности вероятности распределения подачи Q ЗМ на два яруса решет ($r = 1,2,\ldots,c$). При этом подача q_δ ЗМ на δ -й решетный ярус

$$q_\delta = Q\, P_\delta(Q),\qquad (26)$$

где $P_\delta(Q)$ - вероятность подачи ЗМ Q на δ -й решетный ярус; $\varepsilon_{\delta j}, q_{\delta p}$ - полнота просеивания j-го компонента на p-м участке δ -го решет-

ного яруса при подаче $q_{\delta p}$ сыпучего материала на этот участок, которую можно определить из различных выражений [2] в зависимости от многих факторов:

$$\varepsilon_{\delta j}\left(q_{\delta p}\right) = f\left(Q, a_j, W, \gamma, f_j, L_{\delta m}, d_m, \alpha_m, \beta_m, R_m, N_m, n\right), \tag{27}$$

где f_j, γ - вид сыпучего материала (зерно, семена трав и др.) и его плотность; $L_{\delta m}$ - длина m-го решета δ-го решетного яруса; $d_{\delta m}$ - рабочий размер отверстий m-го решета δ-го яруса; $\alpha_{\delta m}, \beta_{\delta m}, R_{\delta m}, N_{\delta m}$ - угол наклона к горизонту, направленность, амплитуда и частота колебаний m-го решета в δ-м ярусе; n - количество решет в ярусе.

При известной полноте просеивания $\varepsilon_{\delta j}$ j-го компонента на отдельном ярусе решет ($\delta = 1,2$), полнота просеивания j-го компонента на двух ярусах решетного модуля определится из выражения, аналогичного (18)

$$\varepsilon_j = \frac{\sum_{\delta=1}^{2} q_\delta a_{\delta j} \varepsilon_{\delta j}}{Q a_j 2}, \tag{28}$$

где $a_{\delta j}$ - содержание j-го компонента в ЗМ, поступающем на δ-й решетный ярус.

Полнота схода $\varepsilon_{CX\delta mj}$ j-го компонента с δm-го решета в очищенную δ-м решетным ярусом фракцию (с первого яруса – с решета: $\delta = 1$, $m = 2$, решета Р12; со 2-го яруса: $\delta = 2$, $m = 2$, решета РВ22):

$$\varepsilon_{CX\delta mj} = \frac{\sum_{p=1}^{e} q_{\delta mp} a_j \varepsilon_{CX\delta mj}\left(q_{\delta mp}\right)}{q_{\delta m} a_j e}, \tag{29}$$

а со всех m-х решет двухъярусного решетного модуля

$$\varepsilon_{CXmj} = \sum_{\delta=1}^{2} P_\delta\left(Q\right) \varepsilon_{CX\delta mj}. \tag{30}$$

Общий выход Q_{b2}, очищенной на втором решетном модуле из двух ярусов решет фракции семян и содержание в ней j-го компонента b_{bj2}, определится из выражений, аналогичных (21) и (22):

$$Q_{b2} = \sum_{j=1}^{b} Q_{b1} b_{bj1} \varepsilon_{CXmj}; \tag{31}$$

$$b_{bj2} = Q_{b1} b_{bj1} \varepsilon_{CXmj} / Q_{b2}. \tag{32}$$

Общее выделение примесей $Q_{П2}$ из ЗМ, поступившего на второй двухъярусный решетный модуль и содержание в них j-го компонента $b_{Пj2}$, определяется из выражений

$$Q_{П2} = \sum_{j=1}^{b} Q_{b1} b_{bj1}\left(1 - \varepsilon_{CXmj}\right), \tag{33}$$

$$b_{\Pi j2} = Q_{b1} b_{bj1} \left(1 - \varepsilon_{CXmj}\right) / Q_{\Pi 2} \,. \quad (34)$$

Математическая модель процесса пневмосепарации фракции семян ЗМ, очищенного во втором решетном модуле, в пневмосепараторе №2 (см.рис.1, рис.2), идентична по форме математической модели сепарации ЗМ в пневмосепараторе №1 (см. (6)-(15)). При этом в эти выражения вводим

$$Q = Q_{b2}\,; \qquad a_j = b_{bj2}\,, \quad (35)$$

выражения плотности вероятности распределения подачи ЗМ $f_Q(B)$ и скорости воздушного потока $f_v(B)$ по ширине B соответственно для пневмосепаратора №2.

Тогда с учетом этих изменений полноту выхода ε_{cj} j-х компонентов в очищенную фракцию семян определяем из выражения (6), выход очищенных в ВРМ семян Q_{oc} и содержание в них j-х компонентов ЗМ – из выражений (15) и (11), выход выделенных отходов $Q_{от}$ и содержание в них j-х компонентов ЗМ – из выражений (14) и (13).

Используя выражение (4), можно оценить величину полноты выхода ε_{Bj} j-го компонента исходного ЗМ в очищенную всей ВРМ фракцию. Здесь ε_{bj} определяем соответственно по формулам: для операции – распределение ЗМ по ширине сепараторов ε_{bj} =1; для операции пневмосепарации в пневмосепараторе №1 $\varepsilon_{bj} = \varepsilon_{cj}$ - по выражению (6), для первого решетного модуля $\varepsilon_{bj} = \varepsilon_{bji}$ - по выражению (18); для второго решетного модуля $\varepsilon_{bj} = \varepsilon_{CXmj}$ - по выражению (30); для пневмосепаратора №2 $\varepsilon_{bj} = \varepsilon_{cj}$ - по выражению (6).

Выводы. Построена функциональная математическая модель воздушно-решётной зерноочистительной машины с последовательным расположением решётных модулей. При заданных аргументах входных $\vec{F}_i$ и управляющих $\vec{A}_i$ воздействий, используя методы нелинейного программирования, можно проводить многомерный анализ и параметрическую оптимизацию семяочистительных машин с рассмотренной структурой элементов.

Библиографический список

1. *Ермольев Ю.И.* Тенденции и перспективы развития технологий и технических средств для семенной очистки зерна / Ю.И. Ермольев, М.В.Шелков, М.Н.Московский // Изв. вузов Сев.-Кав. регион. Сер. Техн. науки.– Ростов н/Д, 2005. – С.112-119.
2. *Ермольев Ю.И.* Интенсификация технологических операций в воздушно-решетных зерноочистительных машинах / Ю.И.Ермольев. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 1998.

Материал поступил в редакцию 21.07.08.

U.I. ERMOLYEV, A.I. MARTINENKO, A.V. BUTOVCHENKO

THE MODELING OF THE GRAIN SEPARATING PROCESS IN AN AERIAL – LATTCED GRAIN CLEANING MACHINE

The adequate mathematical model of the process of the functioning of aerial – latticed grain cleaning machine with mutitier lattice – like moduli has been constructeol.

ЕРМОЛЬЕВ Юрий Иванович (р.1943), доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Сельскохозяйственные машины и оборудование» ДГТУ. Окончил РИСХМ в 1969 году.
Научные интересы: решение проблемы системной сепарации сыпучих гетерогенных сред сельскохозяйственного назначения, направленной на создание новых современных технологий и технических средств для поточной сепарации зерновых и других сельхозматериалов.
Автор более 200 научных публикаций, в том числе трех монографий.

МАРТЫНЕНКО Александр Иванович (р.1963), инженер. Окончил РИСХМ в 1985 г. Специалист в области сельскохозяйственных машин.
Имеет две научные публикации.

БУТОВЧЕНКО Андрей Владимирович (р.1982),ассистент кафедры «Сельскохозяйственные машины и оборудование» ДГТУ. Окончил ДГТУ в 2004 г. Специалист в области сельскохозяйственных машин.
Имеет 13 научных публикаций.